

5. Необходимость и возможность оснащения современных доменных печей системами автоматического распределения дутья нового поколения / Дружков В. Г., Ваганов А. И., Прохоров И. Е., Ширшов М. Ю. // Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2013) с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 182–184.

УДК 669.042

**А. О. Еремин\*, М. Д. Казяев\*\***

\* Национальная металлургическая академия Украины,  
г. Днепропетровск, Украина,

\*\* ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
институт материаловедения и металлургии,  
кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия

## **ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАГРЕВА МЕТАЛЛА**

### **Аннотация**

*Исследование посвящено решению проблемы повышения качества нагрева металла за счет управления движением печных газов и тепломассообменными процессами в промышленных нагревательных печах. В работе показана возможность повышения энергоэффективности управления процессами тепло- и массообмена в рабочем пространстве нагревательных печей с целью экономичного и высококачественного нагрева металла за счет распределенного объемного сжигания топлива и крупномасштабной внутренней рециркуляции печных газов.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, распределенное горение, температурное поле, рециркуляция, качество нагрева, нагревательные печи.*

### **Abstract**

*The research focuses on the solution of the problem related to the increase in metal heating quality due to control of flue gases movement as well as heat and mass exchange processes in industrial thermal furnaces. The research has proved the possibility to raise the efficiency of managing heat and mass exchange processes in the working space of thermal furnaces for the purpose of economical and high quality of metal heating due to distributed voluminous fuel combustion and large-scale inner recirculation of flue gases.*

*Keywords: mathematic modeling, distributed fuel combustion, temperature field, recirculation, power-efficiency, heating furnaces.*

Началом развития металлургической теплотехники как науки можно считать появление первых трудов Владимира Ефимовича Грум–Гржимайло на заре прошлого века [1]. Впервые вопрос научного обоснования конструирования металлургических печей был поднят в его публикации «Элементарная теория построения металлургических печей», вышедшей в журнале «Горное дело» в 1905 году. Гидравлическая теория печей была сформулирована В. Е. Грум–Гржимайло в монографии «Пламенные печи». Основным принципом этой теории стало утверждение о том, что управлять работой печей в первую очередь нужно путем организации правильного режима движения газов с омыванием печными газами всего рабочего пространства без образования застойных зон. Некоторые постулаты гидравлической теории Грум–Гржимайло актуальны и сегодня для большого класса печей.

Этой революционной для своего времени работой было положено первое обоснование научных принципов конструирования и строительства металлургических печей. Фундамент, заложенный гидравлической теорией в печестроение, стал основой развития современной теории печей, получившей развитие в трудах Н. Н. Доброхотова [2], И. Д. Семикина [3], Н. Е. Скаредова, Г. П. Иванцова, В. Н. Тимофеева, М. А. Глинкова, Б. И. Китаева, В. И. Губинского и других известных ученых-теплотехников.

Современная теория печей рассматривает металлургическую теплотехнику в виде комплекса трех равноценных и взаимозависимых параметров: конструктивных и эксплуатационных характеристик, тепло- и массообменных процессов и технико-экономических показателей работы печей. Особенностью сегодняшнего этапа развития печестроения является то, что наряду с проблемами интенсификации теплообмена, повышением скорости нагрева и производительности, все более актуальными становятся вопросы экономической составляющей производства – качества нагрева, энергоэффективности и экологии производства.

Такой подход к эксплуатации топливных нагревательных печей металлургии и машиностроения обозначает следующие основные задачи совершенствования их тепловой работы:

1. Эффективное использование материальных и энергетических ресурсов. Энергоэффективная эксплуатация нагревательных устройств позволяет привести нормы ресурсо- и энергопотребления к теоретически обоснованным показателям.
2. Получение конечного продукта высокого качества.
3. Разработка конструкции печей, имеющих низкий уровень вредных выбросов и минимальное негативное воздействие на окружающую среду.

Целью теории печей является конструирование агрегатов, удовлетворяющих всем технологическим требованиям к производимой продукции, имеющих современные технико-экономические показатели, соответствующие экологическим нормам. Современная теория печей – это теория их конструирования и эксплуатации.

Одной из основных задач тепловой обработки металла в нагревательных печах металлургии остается организация равномерного нагрева изделий. О равномерности нагрева можно говорить в трех аспектах.

Во-первых, показателем, определяющим качество нагрева металла (что особенно актуально для крупнотоннажных термически массивных слитков), является перепад температуры по сечению.

Во-вторых, вследствие концентрированного подвода теплоты и отвода отработанного дыма при факельном сжигании топлива в рабочем пространстве топливной печи создается неравномерное температурное поле. Неравномерность температуры по длине печи приводит

к неравномерности нагрева между слитками – к нестандартности нагрева металла. Понятие стандартности следует распространять только на конечный продукт – выдаваемый из печи металл. В печах камерного типа в случае, когда садка выгружается одновременно, нестандартность нагрева ведет к нарушению сбалансированности дальнейшего процесса обработки металла давлением. Если же металл выдается из печи поштучно, то стандартность нагрева имеет смысл только по отношению к выдаваемому металлу – разнонагретость металла в печи не имеет значения.

В третьих, имеет место перепад температуры по длине или высоте нагреваемого изделия, по различным граням нагреваемого металла.

В существующих печах равномерность и стандартность нагрева добиваются внутренней и внешней рециркуляцией печных газов, реверсом, импульсным нагревом, отдельной по периодам нагрева подачей топлива, качанием горелки, изменением направления факела струей компрессорного воздуха, двухстадийным и многостадийным сжиганием топлива и другими способами управления температурным полем.

Согласно принципу локальности внешнего теплообмена, нагрев садки определяется излучением и конвекцией от газовых объемов, находящихся в непосредственной близости от поверхности. В трудах В. И. Губинского, А. В. Кавадерова и Г. П. Иванцова по лучистому теплообмену отмечается превалирующее влияние на теплоотдачу температуры слоя газа, расположенного непосредственно возле нагреваемой стенки. Наибольшие изменения температуры в процессе теплоотдачи наблюдаются именно в пристеночных слоях газа и основными методами достижения равномерности нагрева садки в печах является рациональное управление движением газов, обеспечивающее перенос теплоты к локальным участкам металла и футеровки.

Одним из перспективных способов равномерной доставки греющих газов к поверхности нагреваемого металла является распределенный объемный способ сжигания топлива с организованной рециркуляцией печных газов. К достоинствам объемного сжигания топлива можно отнести низкое количество вредных выбросов из-за отсутствия высокотемпературных зон, присущих факельному сжиганию топлива, равномерное температурное поле в печи, предпосылки к восстановлению оксидов азота продуктами неполного горения топлива в рабочем пространстве печи.

Организация объемного горения топлива возможна с помощью рециркуляции и реверса печных газов, а также заданного регламентированного перемешивания реагентов горения, когда топливо в рабочем пространстве печи сгорает распределенно на всей траектории движения печных газов.

Организация распределенного объемного сжигания топлива в нагревательных печах, оборудованных высокоэффективными регенераторами (или, иначе, объемно-регенеративного способа сжигания топлива), обеспечивается за счет разделения потоков топлива и воздуха в горелочном устройстве и обеспечения динамических характеристик газо-воздушных струй (скорости истечения, количества движения, кинетической энергии струй, энергии циркуляции печных газов, кратности рециркуляции и т. д.) при которых гарантируется заданное качество перемешивания реагентов горения. Благодаря выбору количества, геометрических параметров и взаимного расположения газовых сопел, каналов для подвода подогретого в регенераторах воздуха горения, дымовых окон и других конструктив-

ных параметров печи и ее элементов создаются условия регламентированного перемешивания топлива и воздуха [8].

Ввиду распределенного горения в печи создается малоокислительная атмосфера, устраняются локальные высокотемпературные зоны, улучшается равномерность нагрева металла и снижается количество вредных выбросов при горении. Наличие регламентированного недожога на выходе из рабочего пространства печи свидетельствует о распределенном объемном горении топлива.

В печах, оборудованных рекуператорами или эксплуатируемым без теплоутилизаторов, дожигание топлива вне рабочего пространства печей ведет к перегреву и выходу из строя теплообменников, а в случае их отсутствия – к прямым потерям топлива.

В печах с регенераторами ситуация иная. Полное сжигание топлива необходимо организовать до выхода дымовых газов в дымовую трубу. При этом выделившаяся химическая теплота с высоким коэффициентом регенерации будет возвращена в печь с подогретым воздухом. Единственным условием в этом случае является полное сжигание топлива до выхода из насадки регенераторов. Наличие в объемной зоне горения топливно-воздушной смеси с температурой, превышающей температуру воспламенения топлива за счет высокотемпературного подогрева воздуха в современных регенераторах, делает возможным горение при любом количестве кислорода.

Применение регенераторов с высокоразвитой поверхностью теплообмена наиболее предпочтительно. Малогабаритные регенераторы удается размещать в непосредственной близости к печи, в некоторых случаях, насадку регенераторов удается скомпоновать в одном устройстве с горелкой или разместить в стенах печи. Уменьшаются потери теплоты при движении горячего дыма и подогретого воздуха на участке между регенератором и печью, исключаются подсосы холодного и выбивание подогретого воздуха в негазоплотных боровых [8].

Использование высокотемпературного подогрева воздуха дополнительно к перечисленным преимуществам объемного сжигания топлива, приводит к существенной экономии топлива.

Одним из основных факторов, влияющих на организацию равномерного температурного поля в нагревательных печах, является рециркуляция печных газов. Ниже приведены результаты исследования влияния крупномасштабной и мелкомасштабной рециркуляции на температурное поле регенеративной печи.

### **Рециркуляция как способ организации объемного сжигания топлива и равномерного нагрева металла в печах**

Применение распределенного объемного сжигания топлива приводит к изменению условий локальной теплопередачи от нагревающей среды к металлу и футеровке в различных точках. Отсутствие концентрированных источников теплоты, присущих факельному способу сжигания топлива, приводит к тому, что вся поверхность нагреваемого металла находится в равнозначных условиях нагревания. Нет застойных зон в печи или металла, находящегося в таких застойных зонах. Распределенное объемное сжигание топлива может быть организовано рециркуляцией печных газов.

Впервые рециркуляция как способ выравнивания температуры в печи была предложена В. Е. Грум–Гржимайло в 1926 году на 3-м теплотехническом съезде в Москве. Уже тогда В. Е. Грум–Гржимайло в докладе «Новая камерная печь с уравнивающей температуру рециркуляцией печных газов» задекларировал решающее значение газодинамических процессов в рабочем пространстве печи: «Мне пришлось от гидростатики, которую я проповедовал, перейти на гидродинамику, так как в печах, построенных на чисто гидростатическом принципе, температура наверху была выше, внизу всегда ниже. Это крупный недостаток печей, построенных на чисто гидростатическом принципе, и с ним надо кончить» [4].

Вопросами исследования влияния кратности рециркуляции печных газов на равномерность температурного поля в рабочем пространстве печи, на качество нагрева металла, на потребляемую тепловую мощность и другие характеристики и параметры занимались А. У. Пуговкин [5], Л. А. Неймарк, В. Д. Брук, А. Е. Еринов и другие ученые. Исследовались печи с кратностью рециркуляции печных газов от 2 до 10 и выше и способы достижения такой рециркуляции.

На сегодняшний день имеется зарубежный опыт применения интенсивной рециркуляции печных газов с целью снижения температуры факела в рабочем пространстве печей.

«Высокотемпературное сжигание в воздушной атмосфере» или технология беспламенного сжигания топлива HiTAC использует высокие скорости истечения реагентов горения с целью организации подмешивания в топливо и воздух печных газов и их развитой рециркуляции.

В другой современной технологии беспламенного окисления FLOX<sup>®</sup> горение также осуществляется одновременно с организацией крупномасштабной внутренней рециркуляции «инертных газов в печи». На основе этой технологии спроектированы рекуперативные REKUMAT<sup>®</sup> и регенеративные REGEMAT<sup>®</sup> горелки беспламенного окисления, а также горелки с внешним подогревом воздуха (горелки FLOX<sup>®</sup>). «Инертный газ» (в основном – дым, образующийся при горении) смешивается с реагентами (топливом и воздухом) в такой пропорции, что пики температуры во фронте пламени сглаживаются и горение переходит из факельного в объемное. Кратность внутренней рециркуляции при HiTAC и FLOX<sup>®</sup> технологиях может достигать  $K_{\text{рец}} = 4$  и более [6].

### **Исследования влияния рециркуляции печных газов на равномерность температурного поля и качество нагрева металла в печи**

Для определения влияния характера движения печных газов и других характеристик на температурное поле в рабочем пространстве печи с петлеобразной траекторией движения печных газов была разработана математическая модель нагревательной печи с торцевым отоплением, основанная на решении уравнения теплового баланса с учетом рециркуляции дыма [7]. В центральной части печи на границе условного разделения потока печных газов на прямую (зоны  $i = 1 \dots i = n$ ) и обратную траектории движения (зоны  $i = n+1 \dots i = 2n$ ) (рис. 1) имеются локальные турбулентные вихри, вовлекающие в массообменные процессы слои печных газов, движущихся в прямом и обратном направлении.

Такое перемешивание далее называли мелкомасштабной или локальной рециркуляцией. Наличие и степень развития локальных зон циркуляции печных газов может изменять режим движения печных газов в широких пределах: от режима «короткого замыкания», ко-

гда весь расход печных газов перетекает из зоны  $i = 1$  в зону  $i = 2n$  (см. рис. 1), до развитого декомпенсированного перемешивания с возвратом части массового расхода газа в начальный участок траектории их движения (траектория движения газов в таком рециркуляционном режиме показана на рис. 1. Промежуточный режим называется режимом вытеснения с компенсированным перемешиванием. Возникновение того или другого движения в реальных условиях зависит от величины энергии струй печных газов.

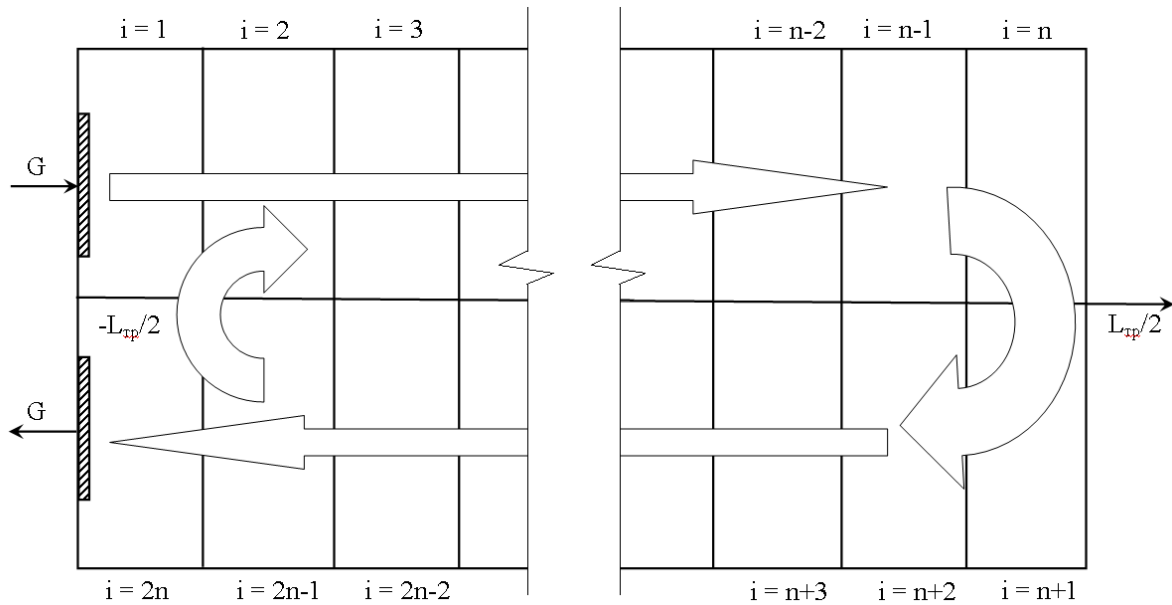


Рис. 1. Петлеобразная траектория движения печных газов в печи в рециркуляционном режиме

В модели учитывается перетекание печных газов через попарно расположенные зоны:  $i = 1 - i = 2n$ ;  $i = 2 - i = 2n-1$ ;  $i = 3 - i = 2n-2$ ; ...  $i = n - i = n+1$ .

Так, физическая теплота смеси печных газов на входе в зону  $i = 1$

$$Q_{\text{ex}1} = B_z \cdot t_m \cdot c_m + L_n \cdot B_z \cdot t_\theta \cdot c_\theta, \quad (1)$$

на входе в зоны  $i = 2 \dots 2n$

$$Q_{\text{ex}i} = \left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} m_k\right) \cdot (B_z \cdot t_{cm\ i-1} \cdot c_m + L_n \cdot B_z \cdot t_{cm\ i-1} \cdot c_\theta) + \sum_{k=1}^{i-1} m_k \cdot v_\theta \cdot B_z \cdot t_{cm\ i-1} \cdot c_\theta + \sum_{k=1}^{i-1} (\Delta G_{jk} - \Delta G_{kj}) \cdot t_{cm\ i-1} \cdot c_\theta / \rho_\theta, \quad (2)$$

на выходе из зоны  $i$

$$Q_{\partial yx i} = \left(1 - \sum_{k=1}^i m_k\right) \cdot (B_z \cdot t_{cm i} \cdot c_m + L_n \cdot B_z \cdot t_{cm i} \cdot c_g) + \\ + \sum_{k=1}^i m_k \cdot v_{\partial} \cdot B_z \cdot t_{cm i} \cdot c_{\partial} + \sum_{k=1}^i (\Delta G_{jk} - \Delta G_{kj}) \cdot t_{cm i} \cdot c_{\partial} / \rho_{\partial}, \quad (3)$$

где  $j = 2n - k + 1$ .

В формулах (1) – (3):  $B_z$  – массовый расход топлива, кг/с;  $t_m$ ,  $t_g$ ,  $t_{cm i-1}$  – начальная температура топлива, температура подогрева воздуха горения и температура смеси топлива, воздуха и дымовых газов в  $(i-1)$ -й зоне печи, °С;  $c_m$ ,  $c_g$ ,  $c_{\partial}$  – массовая теплоемкость топлива воздуха и дыма, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $m_k$  – доля сгоревшего в  $k$ -й зоне топлива.

Теплота продуктов сгорания, попадающих через границу раздела потока печных газов на прямую и обратную траектории движения

$$Q_{pec i} = \Delta G_{ij} \cdot t_{cm i} \cdot c_{\partial} / \rho_{\partial}. \quad (4)$$

Величина  $\Delta G_{ij}$  определяется из закона распределения плотности потока массы продуктов сгорания через границу раздела прямой и обратной траекторий их движения. Для этого, в частности, может быть использована следующая зависимость:

$$\Delta G_{ij} = \begin{cases} 0, & 1 \leq i \leq n/2 \\ k_p (G/n) \cdot (b+1) \cdot |l_i|^b, & n/2 < i \leq n \\ 0, & n < i \leq 3n/2 \\ k_p (G/n) \cdot (b+1) \cdot |l_i|^b, & 3n/2 < i \leq 2n \end{cases} \quad (5)$$

В формуле (5)  $l_i = 2y_i / L_{mp}$  – относительная длина мелкомасштабной рециркуляции;  $y_i = \Delta y(i - 1/2)$  – координата центра зоны  $i$ ;  $\Delta y = L_{mp} / n$  – длина зоны  $i$ ;  $b$  – показатель степени функции распределения;  $k_p = K_{pec} - 1$  – коэффициент, учитывающий кратность рециркуляции печных газов,  $k_p \geq 0$ ;  $i$  и  $j$  – номера зон выхода и входа потока рециркулирующих газов, связанные соотношением  $j = 2n - i + 1$ .

Функция распределения в формуле (5) выбрана таким образом, что изменение показателя степени  $b$  приводит к изменению расхода потоков массы по зонам от равномерно распределенной по длине полутраектории до сосредоточенной в прикорневой зоне факела.

Результаты расчетов для случаев нагрева металла с максимальной тепловой мощностью и минимальным и максимальным результирующим тепловым потоком на металл (по условиям внешнего теплообмена) и минимальной тепловой мощностью приведены на рис. 2.

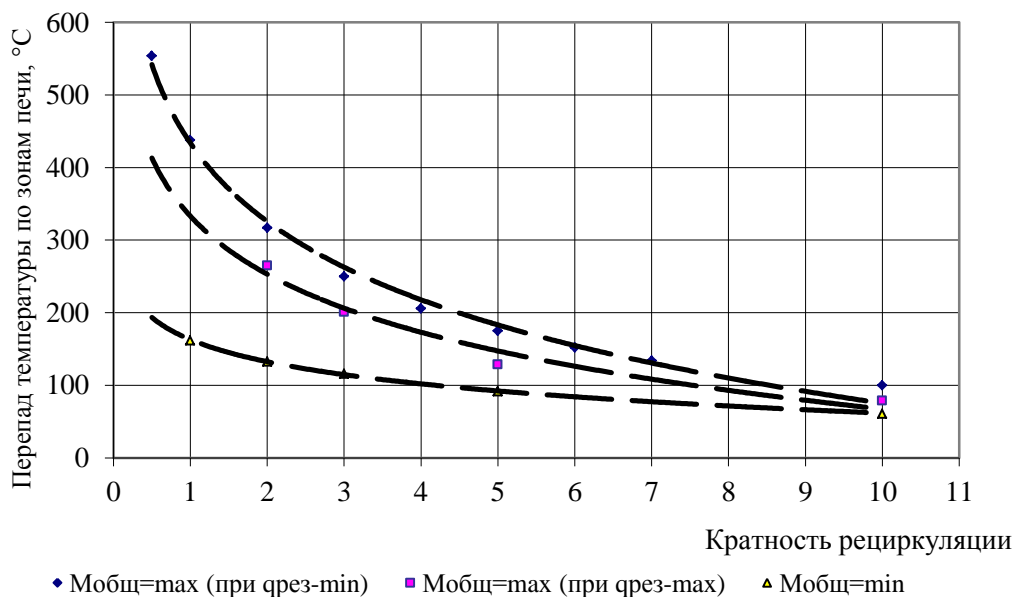


Рис. 2. Зависимость перепада температуры по зонам печи от величины кратности рециркуляции печных газов в различные периоды нагрева

Функции, аппроксимирующие расчетные данные, приведены на рисунке 2 пунктирными линиями, а их выражения представлены в виде (6)–(8).

Для нагрева с максимальной тепловой мощностью при  $q_{рез} = max$  аппроксимирующая функция имеет вид

$$\Delta t_{q-max} = 333,21 - 115,51 \cdot L_n(K_{рец}). \quad (6)$$

Для нагрева с максимальной тепловой мощностью при  $q_{рез} = min$

$$\Delta t_{q-min} = 433,8 - 155,72 \cdot L_n(K_{рец}). \quad (7)$$

Для нагрева с минимальной тепловой мощностью,

$$\Delta t = 163 - 44,007 \cdot L_n(K_{рец}). \quad (8)$$

Для всех случаев точность аппроксимации  $R^2 \geq 0,97$ .

Для определения влияния степени развития локальной мелкомасштабной рециркуляции печных газов на формирование температурного поля в рабочем пространстве печи изменяли значение степени  $b$ , описывающей равномерность распределения мелкомасштабной рециркуляции в печи, в формуле (5) от 0,1 до 100. Этот интервал отражает случаи от равномерно распределенной локальной рециркуляции по длине печи (в пределе при  $b \rightarrow 0$ ) по всем попарно прилежащим зонам траектории движения печных газов до полного исключения мелкомасштабной рециркуляции (при  $b \rightarrow \infty$ ), когда газы движутся по петлеобразной траектории, не обмениваясь через среднюю линию печи массой, аналогично режиму «идеального вытеснения». Результаты расчетов приведены на рис. 3.



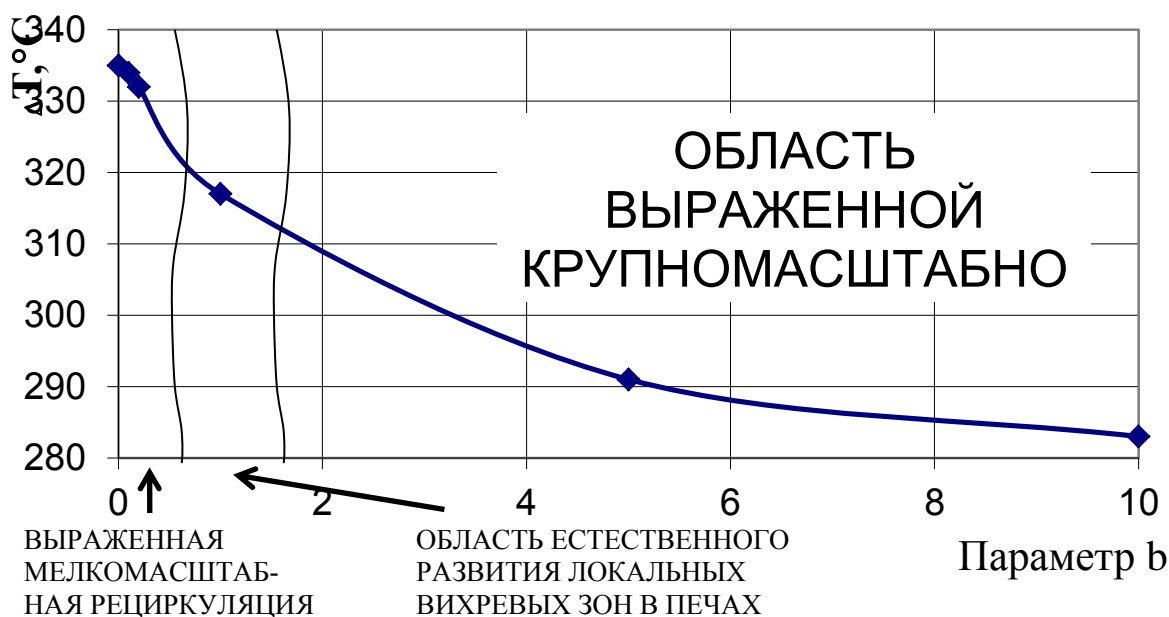


Рис. 3. Зависимость перепада температуры в печи от степени развития локальной мелкомасштабной рециркуляции печных газов (параметр  $b$ )

Результаты расчетов показывают, что локальная мелкомасштабная рециркуляции печных газов также оказывает влияние на формирование температурного поля в печи с петлеобразной траекторией. При изменении доли локальной рециркуляции от нуля (при  $b = 10$ ) до максимальной ее величины при  $b = 0-0,1$  перепад температуры между наиболее нагретой  $i = 5$  и «холодной»  $i = 1$  зонами печи повысился более чем на 15 % [7]. Ухудшение равномерности нагрева связано с уменьшением градиента температур перемешивающихся газов и снижением интенсивности теплопереноса.

Наименьшее значение оценки среднего квадратичного отклонения температуры в зонах печи соответствует случаю, когда наблюдается выраженная крупномасштабная рециркуляция печных газов ( $b = 100$ ). Различия температуры по зонам нагревательной печи с петлеобразной траекторией движения печных газов в этом случае минимально.

Можно уменьшить мелкомасштабную рециркуляцию печных газов, устранив такие причины образования локальных вихрей при движении печных газов, как препятствия на пути движения печных газов (металл, элементы кладки печи, механизмы и т. д.), резкие изменения направления их движения и другие местные сопротивления. Они снижают кинетическую энергию, уменьшают долю кратности крупномасштабной рециркуляции движущихся печных газов, что приводит к ухудшению стандартности нагрева металла.

## Выводы

Анализ результатов моделирования тепловой работы нагревательной печи с петлеобразной траекторией движения печных газов и их рециркуляцией позволил сделать следующие выводы:

1. Максимальная неравномерность температурного поля в нагревательной печи (см. рис. 2) при любом значении кратности внутренней рециркуляции печных газов наблюдается

при нагреве металла с максимальной тепловой мощностью в случае минимального, по условиям теплопередачи, результирующего теплового потока на металл. Интенсификация рециркуляции печных газов позволяет уменьшить неравномерность температурного поля в печи до допустимого значения. Использование графиков и полученных аппроксимирующих функций позволяет определить требуемое значение кратности крупномасштабной внутренней рециркуляции печных газов в нагревательной печи, при которой обеспечивается допустимая по технологии неравномерность температурного поля.

2. Максимальная безразмерная неравномерность температуры по зонам печи, выраженная в виде отношения перепада температуры в печи к средней ее температуре, при повышении кратности рециркуляции с  $K_{\text{рец}} = 1$  до  $K_{\text{рец}} = 4-5$  снижается с 34 % до 14–16 %, увеличение рециркуляции до  $K_{\text{рец}} = 7$  уменьшает безразмерную неравномерность температурного поля еще на 2 %. Дальнейшее повышение рециркуляции малоэффективно: при  $K_{\text{рец}} = 10$  неравномерность температурного поля практически не изменяется [7].

3. При увеличении доли локальной мелкомасштабной рециркуляции неравномерность температурного поля в печи может увеличиться на 15 %. Уменьшение мелкомасштабной локальной рециркуляции связано с устранением препятствий и местных сопротивлений на пути движения печных газов, резкого изменения направления их движения.

#### Список использованных источников

1. Губинский В. И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра // Теория и практика металлургии. 2004. № 6. С. 56–60.
2. Доброхотов Н. Н. Часть первая. Законы теплопередачи // Вестник металлопромышленности. – № 1–3. Русское Металлургическое Общество. № 2. М.: Деловой Двор, 1923. С. 29–40.
3. Семикин И. Д. Теоретические основы расчета нагревательных печей и колодцев // Сталь. 1937. № 12. С. 29–42.
4. Всесоюзный теплотехнический съезд (Москва): труды съезда (10–18 ноября 1926 г., Москва). М.: Теплотехн. ин-т им. В. И. Гриневецкого и К. В. Кирша, 1926. Т. 3. Вып. 1. 1927. 161 с.
5. Пуговкин А. У. Рециркуляционные камерные печи. Л.: Машиностроение, 1975. 200 с.
6. Telger K., Roth W. Опыт работы при применении горелок с режимом беспламенного окисления // Gaswärme international. 1995. Т. 44. № 7–8. С. 332–337.
7. Еремин А. О. Организация регламентированного сжигания топлива в нагревательных печах с целью создания равномерного температурного поля // Металлургическая теплотехника : сб. науч. тр. НМетАУ. Днепропетровск: Новая идеология. 2012. Вып. 4(19). С. 78–83.
8. Еремин А. О., Панасенко И. В. Реализация современного способа сжигания топлива в печах прокатного производства // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 7. С. 236–240.